

**Кондратьев Василий Викторович**

**СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ  
«СВЕРХЛЕГКОГО» ПЕНОБЕТОНА**

**05.23.05 - Строительные материалы и изделия**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Работа выполнена на кафедре технологии строительных материалов, изделий и конструкций в Казанской государственной архитектурно-строительной академии

Научные руководители	- доктор технических наук, профессор Хозин Вадим Григорьевич
	- кандидат технических наук, доцент Морозова Нина Николаевна
Официальные оппоненты	- член-корр. РААСН, доктор технических наук, проф. Прошин Анатолий Петрович
	- доктор технических наук, проф. Недосека Игорь Вадимович
Ведущая организация	- «ВНИИСТРОМ им. П.П. Будникова»

Защита состоится « 1 » июля 2003 года в 13 часов на заседании диссертационного совета К212.077.01 Казанской государственной архитектурно-строительной академии по адресу: 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1, **КГАСА**, ауд. 122.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанской государственной архитектурно-строительной академии.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1, диссертационный совет.

Автореферат разослан « 26 » мая 2003 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Сулейманов А.М.

**Актуальность работы.** Пенобетон - давно известный строительный материал, который применяется в ограждающих конструкциях зданий. Его достоинства как конструкционно-теплоизоляционного материала обусловлены, прежде **всего**, тем, что изготавливается он из цемента - главного строительного вяжущего, и поэтому обладает хорошей эксплуатационной совместимостью с основными конструкционными материалами; он негорюч, нетоксичен, относительно дешев. Однако, как теплоизоляционный материал, пенобетон значительно уступает всем пенопластам и изделиям из минерального и органического волокна по термическому сопротивлению, что связано с его относительно высокой для ТИМ плотностью. Чаще всего промышленный пенобетон и газобетон имеет плотность 400-500  $\text{кг/м}^3$ , очень редко 300  $\text{кг/м}^3$ , но не ниже. Безусловно, это существенно снижает технико-экономические показатели пенобетона, несмотря на относительно простую технологию его производства.

Дело в том, что цементный пенобетон с плотностью 100-200  $\text{кг/м}^3$  и ниже, который Меркин А.П. назвал **суперлегким**, должен иметь специфическую ячеистую структуру, состоящую из пор многогранной формы в отличие от сферической, которая присуща пенобетону более высокой плотности. Такой ячеистой структурой обладают водные пены, однако воплотить ее в пенобетоне пока не удавалось, поскольку для этого необходимы несколько иные подходы.

Исходя из существующих представлений, при гексагональной упаковке сферических пор получение такого пенобетона невозможно, так как их объем составляет 74-82 %, что соответствует плотности 500-350  $\text{кг/м}^3$ . Для плотности 200-100  $\text{кг/м}^3$  объем пор должен быть равен 90-95%. Это возможно только при плотной упаковке многогранных пор, что не выгодно термодинамически. Однако к формированию такой структуры необходимо стремиться, достигая замкнутости пор и стабильности **пенобетонной** смеси.

Для получения **пенобетон**ов низкой плотности можно ускорить сроки схватывания цемента, что позволит зафиксировать структуру в том состоянии, в котором она сформировалась в процессе перемешивания и формования. Но у этого способа есть много недостатков. Макроструктура получаемого материала «рыхлая», с большим количеством открытых пор. Это происходит вследствие связывания свободной **воды**, количество которой в пенобетоне низкой плотности может превышать количество цемента. Быстрое схватывание может зафиксировать неоднородную структуру смеси из-за ограниченности времени перемешивания. Поэтому целесообразно не ускорять сроки схватывания цемента, а искать другие технологические способы регулирования структуры пенобетонной смеси низкой плотности при ее максимальной стабильности.

Решение проблемы стабилизации «сверхлегкой» пенобетонной смеси позволит получить качественно новый, **конкурентноспособный** и эффективный теплоизоляционный материал на основе цементного вяжущего. Этому и посвящена настоящая работа.

**Цель работы.** Разработка структурно-технологических основ получения «сверхлегкого» пенобетона плотностью  $100-200 \text{ кг/м}^3$  и оценка влияния его макроструктуры на физико-механические свойства для последующей практической реализации.

Для ее достижения решались следующие **задачи**:

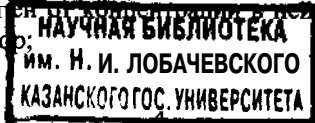
- расчет основных структурных показателей пенобетона на геометрических моделях;
- оптимизация технологических способов управления свойствами пен на базе промышленных пенообразователей;
- выявление факторов стабильности «сверхлегкой» пенобетонной смеси;
- исследование влияния параметров пен и цементного теста на формирование макроструктуры и свойств «сверхлегкого» пенобетона;
- разработка производственных режимов получения «сверхлегкого» пенобетона и их опытно-промышленная реализация.

**Автор защищает:**

- модельные представления о структуре пор, которая использована для расчета основных структурных показателей легких ячеистых материалов и состоит из ромбододекаэдров;
- зависимость стабильности от концентрации пенообразователя (ПО) в объеме пены с учетом площади поверхности последней;
- **двухстадийный** способ получения водных пен с максимальным коэффициентом использования пенообразователя;
- результаты комплексного исследования влияния составляющих пенобетонной смеси на структуру и свойства «сверхлегкого» пенобетона;
- результаты опытно-промышленного внедрения разработанных составов «сверхлегкого» пенобетона.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

- обоснована **ромбододекаэдрическая** форма пор для расчета структурных характеристик ячеистых материалов;
- выведены математические зависимости и предложен порядок расчета прочности ячеистых материалов, исходя из структурных параметров;
- установлена зависимость стабильности различных видов пен от их подвижности и предложена формула для ее расчета;
- установлена и экспериментально подтверждена зависимость стабильности пен от концентрации ПО с учетом площади поверхности пор;



- установлено положительное влияние увеличения плотности пены, а также уменьшения В/Ц и дисперсности цемента на процесс формирования макропористой структуры «сверхлегкого» пенобетона (СПБ) и предложен механизм стабилизации «сверхлегкой» пенобетонной смеси (СПБС);
- выявлена и теоретически определена максимальная толщина межпоровой перегородки в пенобетоне низкой и средней плотности, согласно которой рассчитан оптимальный средний диаметр пор для СПБ.

### **Практическая ценность состоит в следующем:**

- разработаны структурно-технологические основы получения «сверхлегкого» безавтоклавного пенобетона плотностью 100-200 кг/м<sup>3</sup>,
- разработан **двухстадийный** способ приготовления водных пен на основе промышленных пенообразователей;
- предложена новая методика определения оптимальной плотности пен, используемых для получения «сверхлегкого» пенобетона;
- разработан способ расчета прочности пенобетонов по их структурным параметрам и прочности цементного камня;
- разработана ускоренная методика определения стабильности пен по их подвижности;
- разработан проект технологического регламента на производство «сверхлегкого» пенобетона;
- выпущена опытно-промышленная партия стеновых пенобетонных блоков с плотностью 150-200 кг/см<sup>3</sup>, расчетный экономический эффект от применения которых составляет 170 р/м<sup>2</sup>.

**Апробация работы и публикации.** Представленные в диссертации результаты исследований публиковались и докладывались на шестых академических чтениях РААСН/ ИвГАСА г. Иваново, (2000); на Международной НПК «Рациональные энергосберегающие **конструкции**, здания и сооружения в строительстве и коммунальном хозяйстве», г. **Белгород, БелГТАСМ**, (2002); в Мордовском Государственном Университете, г. Саранск, (2002); на Международной НТК «Композиционные строительные материалы. Теория и практика» г. Пенза, ПенГАСА, (2000).

**Объем и структура** работы. Диссертация включает **введение, 1116** глав, общие выводы, список использованных источников из 130 наименований и приложение. Изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 21 таблицу, 42 рисунка.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов.

**В первой главе** изложен анализ литературных данных о **структурообразовании** пенобетонов, начиная с рассмотрения структуры и свойств водных пен и **пенобетонных** смесей и завершая основными технологическими факторами, влияющими на макроструктуру пенобетона.

Рассмотрены достижения отечественных и зарубежных авторов в области производства и формирования структуры безавтоклавного пенобетона, а также возможности снижения его плотности: П.А. Ребиндера, А.А. Брюшкова, Ю.П. Горлова, А.П. Меркина, А.Т. Баранова, В.В. **Макаричева**, М.Я. Кривицкого, Н.И. Левина, А.Н. Чернова, В.А. Пинскера, К.И. **Бахтиярова**, Т.А. Уховой, П.И. Баженова, А.А. Ахундова, А.С. **Коломацкого**, И.Б. Удачкина и др.

Установлена слабая изученность вопроса снижения плотности пенобетона до  $200-100 \text{ кг/м}^3$ , высокая пористость которого - 90-95% - может быть достигнута только при получении стабильной полиэдрической структуры пор.

Предыдущие исследования, выполненные на бетонах плотностью выше  $250 \text{ кг/м}^3$ , основаны на стабилизации пенобетонной смеси двумя способами:

- стабилизации водных пен;
- ускорением сроков схватывания цементного теста.

Стабильность пен, применяемых при производстве пенобетона, регулируется тремя способами:

- изменением химического строения молекулы **ПАВ**;
- увеличением вязкости пен;
- введением тонкомолотых минеральных порошков.

Однако антифрикционное (пластифицирующее) действие поверхностно-активных веществ, которое мало изучено в пенах, может явиться определяющим фактором их стабильности. Пластификация непосредственно связана с концентрацией **ПАВ** в растворе. Считается, что максимальная стабильность пен обеспечивается:

- предельной адсорбцией **ПАВ**;
- достижением **ККМ** (критической концентрации **мицеллообразования**);
- концентрацией меньшей предельной адсорбции **ПАВ**.

Таким образом, нет однозначного мнения, при какой концентрации **ПАВ** в растворе достигается максимальная стабильность.

В формировании структуры пен и пенобетонной смеси значительную роль играет плотность пен. Она влияет также и на процесс твердения пенобетона. Из литературных источников следует, что оптимальные прочностные показатели пенобетона достигаются при  $V/D=0,6-0,8$ . В этот показатель входит как вода, содержащаяся в цементном тесте, так и вода в пене, однако каким образом та и другая влияет на формирование структуры материала, особенно пенобетона низкой плотности, неизвестно. «Сверхлегкая» пенобетонная смесь

нестабильна. Принято считать, что ее стабильность связана со стабильностью пены и качеством перемешивания последней с цементным тестом, что вполне очевидно.

Однако, для пенобетона низкой плотности число факторов разрушения структуры больше, чем в пенобетоне плотностью выше 250 кг/м<sup>3</sup>. Известные показатели: **В/Ц** цементного теста, плотность пены, концентрация ПО в растворе и другие - определяют формирование макроструктуры и прочность этих **пенобетонов**. Каким образом эти параметры будут влиять на возможность получения «сверхлегкого» пенобетона марок **D200-D100** и его **прочность**, пока не ясно.

Определяющим фактором прочности пенобетона, наряду с прочностью цементного камня, является макроструктура материала. Существует ряд моделей структуры, но нет единого мнения о роли формы и размера пор. Есть все основания предполагать, что «сверхлегкие» пенобетоны отличаются не только большим объемом пор, но и их формой и параметрами **межпоровых** перегородок. И формирование макропористой структуры «сверхлегких» пенобетонов, безусловно, требует более глубокого анализа ее зависимости от технологических факторов и более «тонкого» соблюдения режимов приготовления пены, пенобетонной смеси, состава и свойств исходных компонентов. В целом, взаимосвязь структурно-технологических факторов, как основа для получения «сверхлегких» пенобетонов, может быть представлена следующим образом (рис. 1).

**Во второй главе** приведены характеристики применяемых материалов, приборов, устройств и методов экспериментальных исследований.

При получении «сверхлегкого» пенобетона в качестве вяжущего использовали серийно выпускаемые цементы **ПЦ 400-Д20** Ново-Ульяновского цементного завода и **ПЦ 400-Д0** Вольского цементного завода (удовлетворяющие требованиям ГОСТ 10178-85).

В исследованиях были использованы пенообразователи следующих марок: ТЭАС, «**Пеностром**», «Неопор», ПО-6ТС, ПО-6МТ, ПО-6ЦТ. Эти пенообразователи, кроме «Неопора», являются жидкими синтетическими **ПАВ** на основе **триэтаноламиновых** солей **алкилсульфатов** первичных жирных спиртов фракции **С8-С14**, применяемыми при пожаротушении, производятся **Ивановским Химпромом**. «Неопор» - жидкий пенообразователь белкового происхождения, производится в Германии.

Фактические данные физико-механических испытаний подвергались статистической обработке с вычислением среднеарифметических значений результатов испытаний (**М**), среднеквадратичного отклонения (**О**), коэффициента вариаций (**V**) и определением количества образцов (**n**), необходимых для получения результатов с заданной степенью точности (**P**).

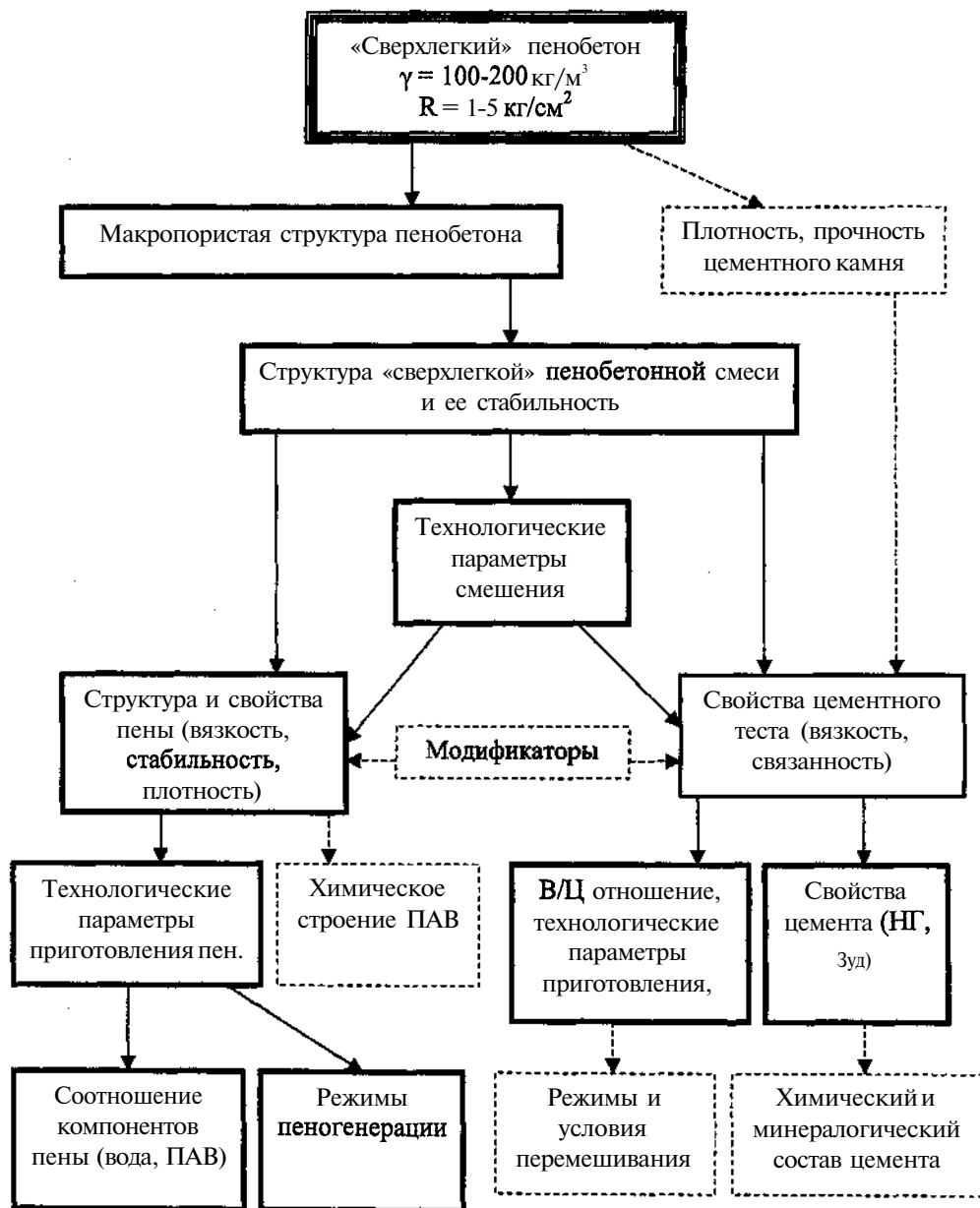


Рис. 1. Взаимосвязь структурных и технологических параметров при получении «сверхлегкого» пенобетона



Стандартные испытания цемента проводили в соответствии с ГОСТ 310.1-3-76 и ГОСТ 310.4-81.

Физико-механические свойства пенобетона определяли следующим образом: прочность при сжатии бетона ( $R_{сж}$ ) - на образцах-кубах с ребром 100 мм по ГОСТ 10180; среднюю плотность по ГОСТ 17177-94; водопоглощение ( $W$ ) - по ГОСТ 17177-94; сорбционную влажность ( $W_{сорбц}$ ) - по ГОСТ 17177-94; теплопроводность ( $X$ ) - по ГОСТ 7067-97; паропроницаемость ( $\alpha$ ) - по ГОСТ 12852.5-77; усадку при высыхании - по ГОСТ 25485-89.

Стабильность пен определяли по методике ЦНИПС-1. Кратность пены вычисляли как отношение полученного ее объема к объему раствора, взятого для испытания. Плотность пены определялась взвешиванием единицы ее объема. Средний диаметр пор пенобетона определялся по ГОСТ 22023-76.

Оценку макропористой структуры проводили методом прямого сканирования срезов образцов пенобетона на сканере CanoScan D1250U2. Сканированные изображения распознавались с помощью программы PhotoShop 6.0.

В третьей главе предложен способ расчета макроструктурных параметров ячеистых материалов, исходя из модели гексагональной упаковки ромбодекаэдрических пор одинакового размера. Установлена взаимосвязь между кубической и гексагональной упаковкой пор. Доказано, что при замене кубов на ромбодекаэдр изменяется удельная поверхность пор, а т.к. ромбодекаэдр приближается по своим характеристикам к сфере, то именно его целесообразно использовать при расчете макропористой структуры пенобетона. Исходя из этого, предложен порядок расчета толщины межпоровых перегородок  $\delta$  и коэффициента площади поверхности пор  $S$  (рис. 2) при  $d_{сф}$  - среднем диаметре пор, мм.

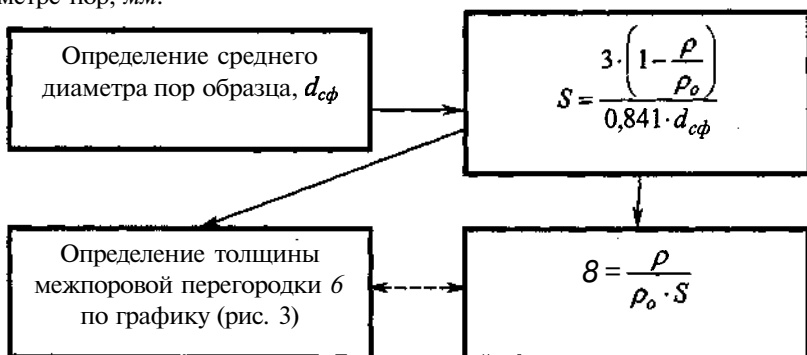


Рис. 2. Порядок расчета толщины межпоровой перегородки  $\delta$ , где  $\rho$  и  $\rho_o$  - плотность ячеистого материала и материала матрицы

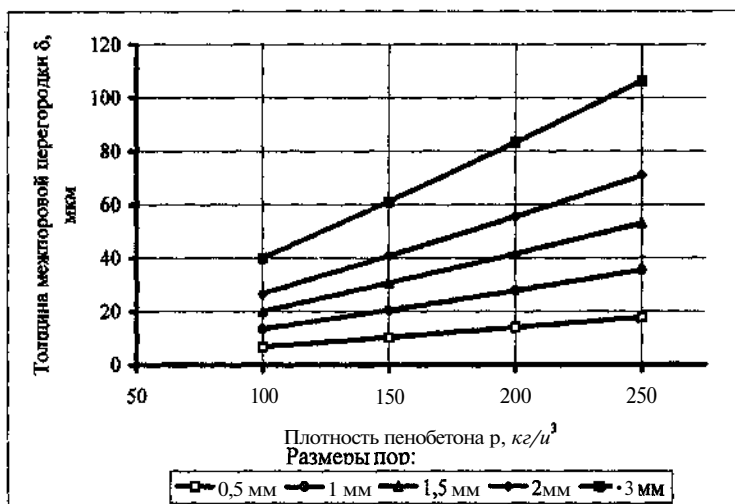


Рис. 3. Зависимость расчетной толщины межпоровой перегородки  $\delta$  от размера пор  $d_{сф}$  и плотности пенобетона  $\rho$

Рассмотрены технологические способы приготовления пен на различных видах пенообразователей. Предложен **двухстадийный** способ **пеногенерации**, эффективность которого оценивается коэффициентом использования пенообразователя ( $\mathfrak{R}_{исп}$ ) и толщиной слоя ПО на поверхности пузырька -  $\delta_{ПО}$  (формулы 1, 2).

$$\mathfrak{R}_{исп} = \frac{V_n}{V_{ПО} \cdot 1000}, \quad (1)$$

где:  $V_{ПО}$  - объем пенообразователя (л),  
 $V_n$  - объем пены (л).

$$\delta_{ПО} = \frac{V_{ПО} \cdot d_{сф} \cdot 0,841}{V_n \cdot 6 \left( 1 - \frac{\rho_n}{\rho_s} \right)}, \quad (2)$$

где:  $\rho_n$  - плотность пены, г/л;  
 $\rho_s$  - плотность водного раствора ПО (~1000 г/л).

Зная содержание воды в ПО (**пеноконцентрате**), а это, как правило, более 50%, и количество истекшего раствора ПО из пены до начала момента ее **разрушения**, можно рассчитать толщину слоя поверхностно-активных **веществ**, влияющих на устойчивость пузырька.

Установлена зависимость стабильности пен, полученных на различных видах пенообразователей от их подвижности. Разработана методика определения оптимальной плотности пен для получения сверхлегкого пенобетона.

Пены являются основным структурообразующим компонентом пенобетона. Поэтому к ним предъявляются высокие требования, касающиеся стабильности. При производстве «сверхлегкого» пенобетона эти требования ужесточаются и увеличивается их количество. Для экспериментальной оценки этого был взят ряд **пеноконцентратов** как синтетического, так и белкового происхождения. Пены приготавливали при частоте вращения мешалки 500 об/мин, при разных концентрациях ПО в растворе и постоянном объеме воды  $V_w = \text{const}$ . Полученные пены можно поделить на 3 группы:

- 1 группа - **низкостабильные** (ТЭАС, Пеностром);
- 2 группа - **среднестабильные** (ПО-6ТС, Неопор);
- 3 группа - **высокостабильные** (ПО-6МТ, ПО-6ЦТ).

Для пен первой группы характерно снижение стабильности при увеличении их плотности и уменьшении концентрации. Стабильность пен третьей группы растет с увеличением плотности и уменьшением концентрации. Пены второй группы имеют максимальную стабильность при определенной **концентрации**, которую можно принять равной критической концентрации **мицеллообразования (ККМ)**.

Теоретически можно предположить, что при постоянном расходе ПО объем пены должен оставаться постоянным (рис. 4, кривая 1).

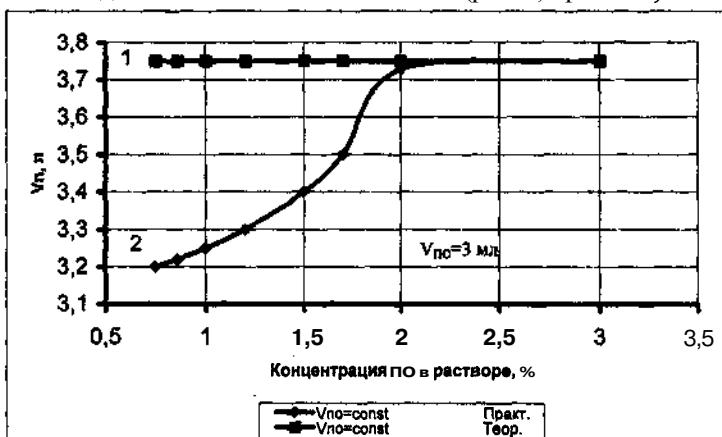


Рис. 4. Зависимость объема пены от концентрации пенообразователя ПО-6ТС в растворе

Однако этого не происходит, и объем пены уменьшается с **уменьшением** концентрации ПО в растворе и увеличением объема самого

раствора (рис. 4, кривая 2). Уменьшается пенообразующая эффективность ПО, плотность пены возрастает.

В этой связи предложен **двухстадийный** способ приготовления пены, суть которого заключается в следующем. На первой стадии пена готовится из раствора ПО, концентрация которого соответствует точке достижения максимального объема пены (рис. 4).

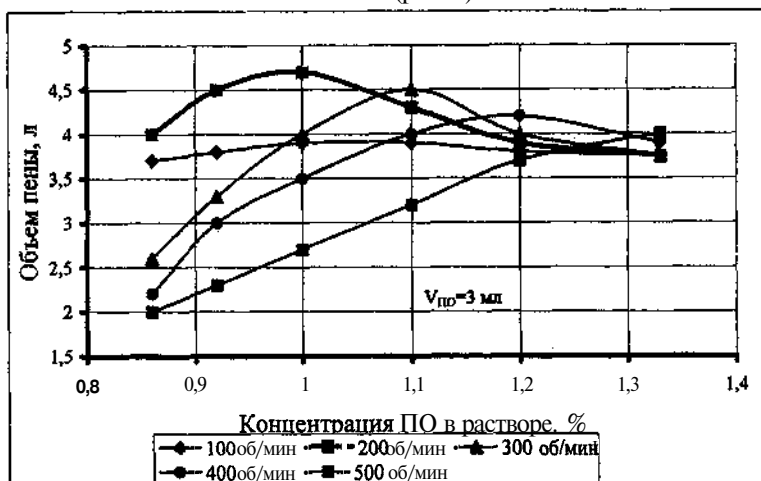


Рис. 5. Зависимость объема полученной пены от концентрации ПО в растворе и частоты вращения мешалки

На второй стадии в получаемую пену добавляются дополнительные объемы воды, т.е. снижается концентрация ПО в растворе и регулируется частота вращения мешалки (рис. 5).

Объем пены, полученный при частоте вращения мешалки 200 об/мин и концентрации 1%, превысил первоначальный объем более чем на 20%. Проверка «двухстадийного» способа получения пен на различных видах ПО говорит о его эффективности (табл. 1).

Таблица 1

Свойства пен, полученных на различных видах ПО  
двухстадийным способом

Наименование	ТЭАС	Пеностром	Неопор	ПО-6ТС	ПО-6МТ	ПО-6ЦТ
$V_{В1}$ , мл	150	150	200	150	150	150
$V_{ПО}$ , мл	3	3	4	3	8	3
$V_{П1}$ , л	5,6	5,6	4	3	2,2	2,7
$\rho_{П1}$ , кг/м <sup>3</sup>	27	27	50	50	67	55
$V_{В2}$ , мл	25	35	50	100	150	200
$V_{П2}$ , л	5,8	5,8	4,5	4,2	3,7	4
$\rho_{П2}$ , кг/м <sup>3</sup>	30	32	56	60	80	90
Увел. стаб., %	20	20	0	20	33	15

где:  $V_{В1}$ - объем первоначально взятой воды;  $V_{ПО}$ - объем взятого пенообразователя;  $V_{П1}$ - объем пены, полученной после первой стадии пеногенерации;  $\rho_{П1}$ - плотность пены  $V_{П1}$ ;  $V_{В2}$ - объем дополнительно введенной в пену воды;  $V_{П2}$ - объем пены, полученной после второй стадии пеногенерации;  $\rho_{П2}$ - плотность пены  $V_{П2}$ .

Как видно из табл. 1, увеличение объема пены ( $V_{П2}$ ) при постоянном объеме ПО ( $V_{ПО}=\text{const}$ ) привело к увеличению ее стабильности на 15-30%. Следовательно,  $R_{исп}$  отображает изменение стабильности пен, причем с его увеличением стабильность возрастает.

Стабильность пен также связана с их подвижностью (рис. 6).

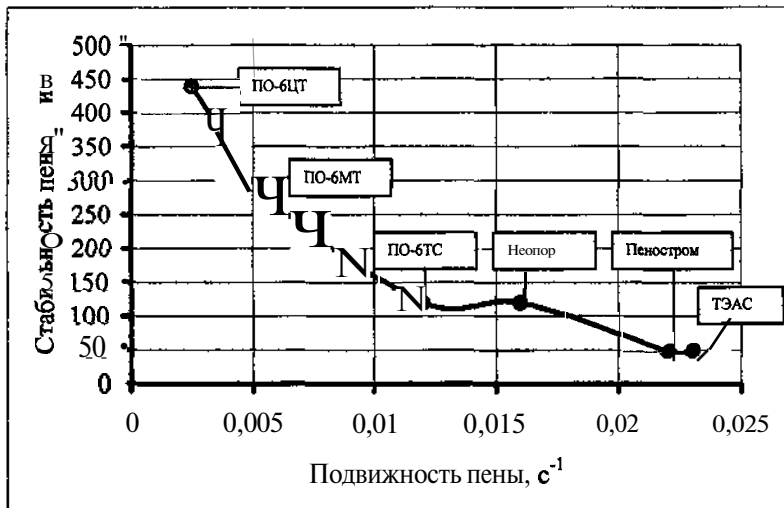


Рис. 6. Зависимость стабильности различных типов пен от их подвижности при  $R_{исп}=\text{max}$

Построенная зависимость описывается формулой:

$$y = -169,4 \ln(x) - 597,64 \quad (3)$$

По уравнению (3) можно рассчитать стабильность различных видов пен в зависимости от их подвижности.

На процесс получения пенобетона большое влияние оказывает плотность пены. До сих пор оптимальная плотность пены подбиралась, исходя из условия минимального В/Ц отношения. Однако низкая плотность пены может привести к частичной агрегации цементного теста. Для определения оптимальной плотности предложен метод, основанный на термодинамических свойствах пен. Суть его заключается в следующем. Стеклообразная трубка с площадью сечения  $1 \text{ см}^2$  заполняется на высоту

100 мм пеной и приводится в соприкосновение с подкрашенной жидкостью. По высоте окрашивания пены определяется ее **водововлекающая** способность. Критерием оптимальности является та плотность пены, при которой достигается минимальное значение этого показателя.

В четвертой главе проведен расчет прочности ячеистых материалов и сравнение его результатов с экспериментальными данными. Установлено влияние В/Ц цементного теста,  $R_{исп}$  и плотности пены на стабильность «сверхлегкой» пенобетонной смеси (СПБС). Предложены технологические способы регулирования структуры «сверхлегкого» пенобетона (СПБ).

Расчет прочности ячеистых материалов был проведен исходя из **ромбододекаэдрической** упаковки пор с использованием формул, изображенных на рис. 2 и формулы 4.

$$S_{отн} = \frac{(2a_k + \delta) \cdot \delta}{(a_k + \delta)^2} \quad (4)$$

где:  $S_{отн}$  - единица площади материала матрицы в сечении ячеистого материала;  $a_k = 0,841 \cdot d_{сф}$ .

Прочность ячеистых материалов рассчитывается по формуле 5.

$$R = \frac{R_o \cdot \rho}{\rho_o} \cdot S_{отн} \quad (5)$$

где:  $R_o$  - прочность материала матрицы.

Построена зависимость прочности пенобетона от плотности при значениях прочности цементного камня -  $780 \text{ кг/см}^2$  и плотности -  $2600 \text{ кг/м}^3$ .

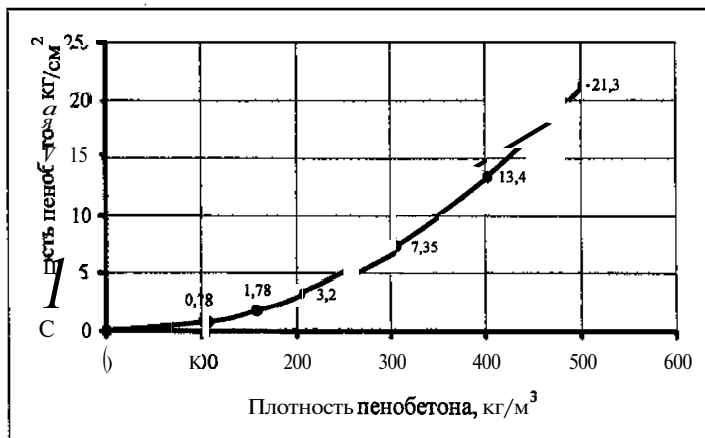


Рис. 7. Зависимость прочности пенобетона от его плотности

Результаты (рис.7) практически полностью совпадают с литературными данными. Погрешность составляет **0-10%**. Следовательно, предложенное нами уравнение (5) можно использовать для расчета прочности пенобетона.

Возможность получения СПБ зависит от стабильности СПБС, на которую, кроме стабильности пены (**ПО-6ЦТ**), влияют: плотность пены,  $R_{исп}$  и **В/Ц** цементного теста. При уменьшении  $R_{исп}$  или росте **В/Ц** стабильность СПБС снижается.

Разрушение смеси происходит сверху вниз по мере истечения воды из нее. На основе анализа структуры СПБ по высоте предложена гипотеза о самозалечивании пор. Суть ее состоит в следующем. Вода стекает из верхних слоев СПБС в нижние. Она содержит мельчайшие частицы цемента и образовавшиеся к тому моменту кристаллогидраты. Стекая, вода фильтруется через наиболее слабые места структуры. При этом происходит постепенное заполнение дефектов частицами цемента и продуктами его гидратации.

На структуру сверхлегкого пенобетона влияет плотность пены, удельная поверхность цемента (рис. 8) и  $R_{исп}$ .

Средний диаметр пор для марки пенобетона **D100** колеблется в пределах 2-1,7 мм, это в два раза больше среднего диаметра пор пены. Следовательно, в процессе приготовления СПБС происходит частичная **коалесценция** пор, которая объясняется нарушением сплошности **межпоровой** перегородки. Причиной этого является дисперсность цемента (рис. 8).

Сравнивая результаты, полученные на цементе с  $S_{уд}=3300 \text{ см}^2/\text{г}$  с результатами полученными на цементе с  $S_{уд}=4000 \text{ см}^2/\text{г}$ , можно сделать **вывод**, что уменьшение среднего диаметра пор в пенобетоне плотностью 100 и 150  $\text{кг}/\text{м}^3$  приведет к резкому снижению прочности материала (рис. 9). Увеличение дисперсности цемента повлекло за собой увеличение его способности «бронировать» большую площадь поверхности пор. Т.е. **коалесценции** не произошло, и средний диаметр пор пенобетона стал практически равен среднему диаметру пор пены. С увеличением площади поверхности пор уменьшилась и толщина межпоровой перегородки.

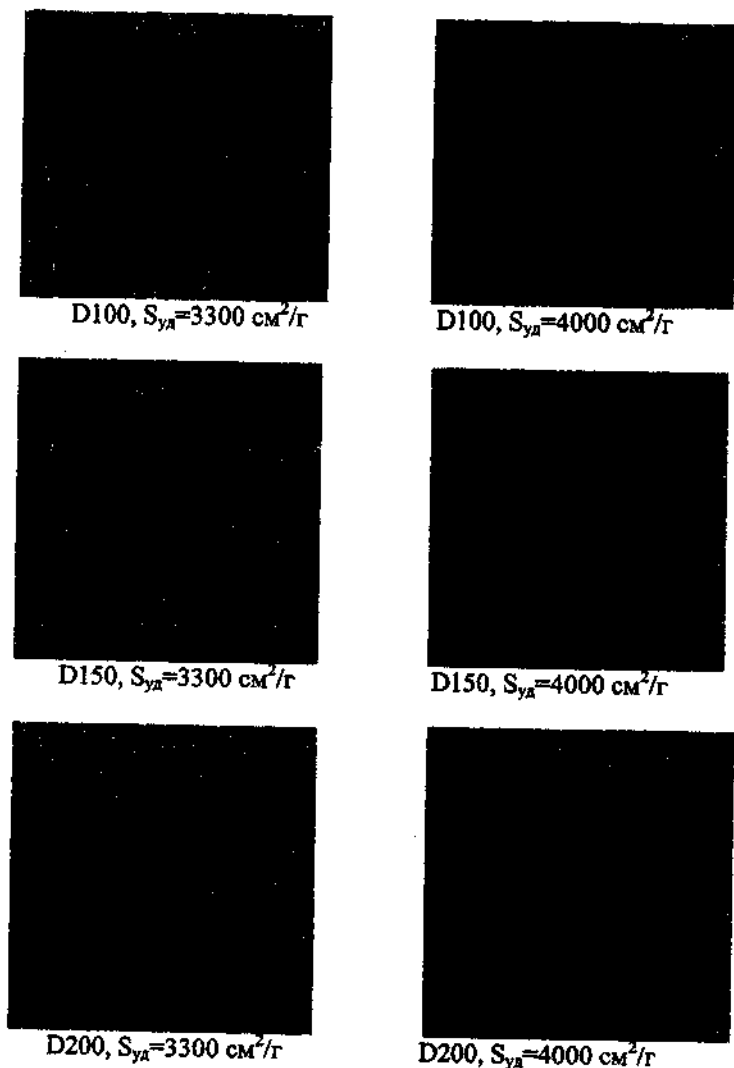


Рис. 8. Влияние **удельной** поверхности цемента на средний диаметр пор «сверхлегкого» пенобетона

Очевидно, что при большей толщине перегородки, т.е. в большем объеме цементного камня, процессы кристаллизации и твердения протекают интенсивнее. Следовательно, существует такое критическое значение  $\delta$ , при котором процессы твердения затухают. Рассчитаем  $\delta$  по формулам рис. 2 для пенобетона плотностью  $100 \text{ кг/м}^3$  при среднем диаметре пор  $0,5 \text{ мм}$ . Получим расчетную критическую **толщину** меж-



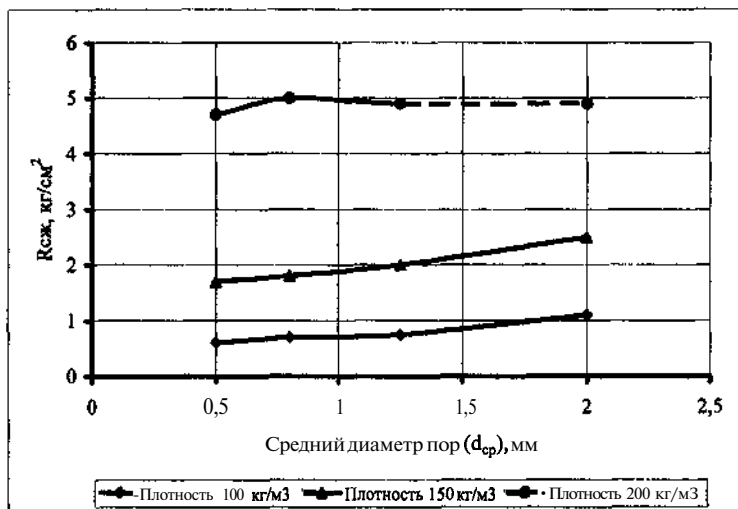


Рис. 9. Изменение прочности СПБ в зависимости от плотности и среднего диаметра пор

поровой перегородки равную 5,6 мкм. Эта величина среднего диаметра частиц цемента. Сравнивая показатели рис. 9 и 3, можно сказать, что максимальная прочность пенобетона достигается при толщине перегородки не менее 20 мкм. Практически неизменяемая прочность для пенобетона марки D200 говорит о том, что площадь цементного камня в сечении материала не **меняется**, следовательно, не меняется и максимальная толщина межпоровой перегородки  $\delta_{max}$ . Таким образом,  $\delta$  СПБ должна быть равна 20–30 мкм при плотности цементного камня 2600 кг/м³. Дальнейшее увеличение  $\delta$  невозможно, и цементный камень идет на формирование сферической формы пор. Поэтому средний диаметр пор для пенобетона плотностью 100, 150 и 200 кг/м³ должен составлять 1,5–2; 1–1,5; и 0,75–1 мм, соответственно.

Влияние диаметра пор на прочность «сверхлегкого» пенобетона неоднозначно при изменении его плотности (рис. 9). С увеличением плотности материала воздействие размера пор на прочность практически пропадает.

Прирост плотности дает непропорциональный прирост прочности. Тем не менее, экспериментальные данные практически повторяют данные расчетные, полученные по формуле (5) (рис.10). Совпадение экспериментальной и практической кривых подтверждает правильность предложенного расчета прочности пенобетона. А, следовательно, также не вызывает сомнения правильность расчета толщины межпоровой перегородки и площади материала матрицы в сечении.

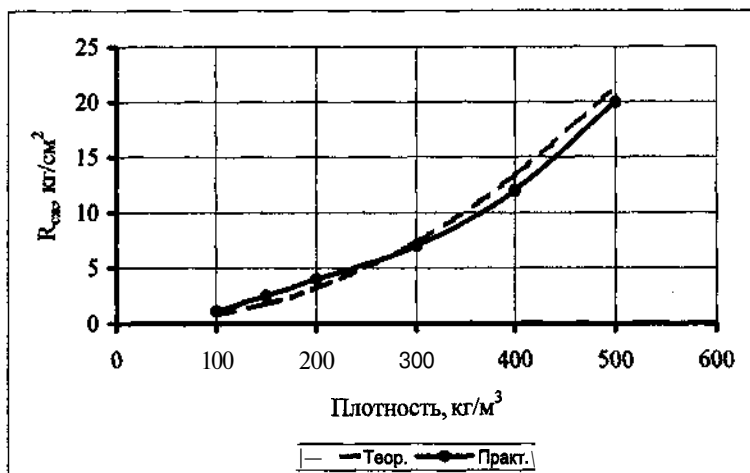


Рис. 10. Влияние плотности СПБ на прочность

Если сравнивать значения теоретических и практических значений прочности СПБ, то коэффициент вариации для плотности 100-200  $\text{кг/м}^3$  будет составлять 13-15%, а для плотности 300  $\text{кг/м}^3$  и более 1-3%. Причем экспериментальные значения прочности пенобетона марок **D100-D200** лежат выше теоретической кривой, а марок выше **D300** несколько ниже. Вероятно, при низких плотностях материала прочность цементного камня, находящегося в **межпоровых** перегородках, больше, чем при высоких. Объяснить некоторое уменьшение прочности пенобетона **D300** и выше можно изменением формы **пор** и ее переходом от многогранной к сферической. Вследствие этого происходит уменьшение толщины межпоровой перегородки в сравнении с теоретическим ее значением, а, следовательно, и уменьшение площади цементного камня в сечении материала.

Основным показателем «сверхлегкого» пенобетона, как теплоизоляционного материала, является коэффициент теплопроводности, по значению которого его можно отнести к эффективным ТИМ (табл. 3).

Важный показатель, определяющий долговечность материала, это **влажностная** усадка. Для СПБ усадка имеет большое значение, поскольку появление магистральных трещин приводит к ухудшению теплотехнических показателей и может привести к его полному разрушению. На рис. 11 четко прослеживается тенденция снижения усадки при увеличении среднего диаметра пор. Некоторые образцы, имеющие средний диаметр около 0,5 мм, через три месяца наблюдений разрушились.

Таким образом, для повышения долговечности материала надо стремиться к увеличению среднего диаметра пор в СПБ.

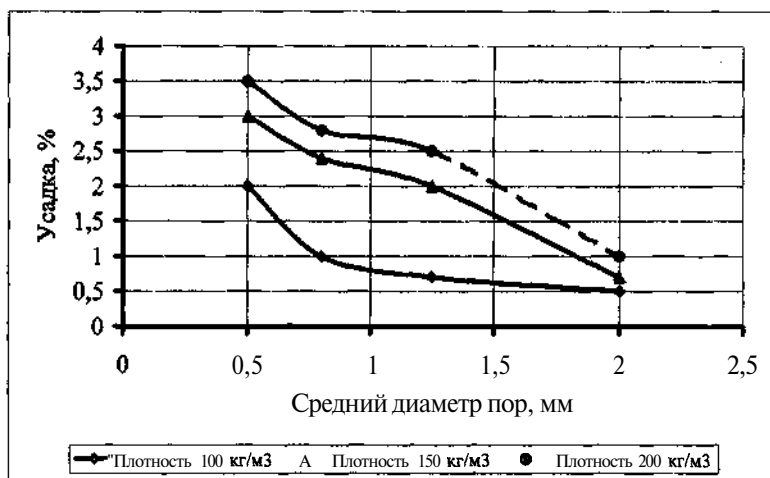


Рис. 11. Влияние среднего диаметра пор на усадку СПБ

В табл. 3 представлены основные физико-механические характеристики полученного нами безавтоклавного СПБ в сравнении с другими ТИМ.

Таблица 3

Основные физико-механические показатели «сверхлегкого» пенобетона

Марка пенобетона	$\mu$ , мг/мчПа	$\lambda$ , Вт/м °С	$W_{ср\text{бл}}$ , %	$W$ , %	$R_{сж}$ , кг/см <sup>2</sup>
D100	0,4	0,045	8	30	1
D150	0,34	0,055	7,7	28	2,5
D200	0,3	0,07	9	25	5,1
Аналог D200	-	0,07	8	-	3,5
Минераловатная плита, $\rho=175-200 \text{ кг/м}^3$	0,5-0,6	0,05- 0,055	-	30	-

В пятой главе приводятся рабочие составы и условия изготовления «сверхлегкого» пенобетона на заводе ЖБИ.

Разработанная технология и составы послужили основой к внедрению линии по производству пенобетона на заводе ЖБИ г. Волжска.

Выпущена опытно-промышленная партия пенобетона плотностью 150-200 кг/м<sup>3</sup>.

Приведено экономическое обоснование и сделан вывод о конкурентоспособности «сверхлегкого» пенобетона по сравнению с минераловатными теплоизоляционными материалами.

## Общие выводы

1. С целью разработки технологии получения (производства) «сверхлегкого» теплоизоляционного пенобетона плотностью  $100-200 \text{ кг/м}^3$  на рядовых **портландцемент**ах и промышленных пенообразователях осуществлен расчет основных параметров его структуры на геометрических моделях и экспериментально исследованы закономерности образования и свойств водных пен, структура и свойства **пенобетонных** смесей и пенобетона.

2. На базе **ромбодекаэдрической** модели ячеистой структуры, обеспечивающей максимальную упаковку замкнутых пор, проведен расчет основных структурных параметров пенобетона (удельной поверхности пор, толщины **межпоровых** перегородок и их площади по сечению материала), а на их основе - прочность пенобетона, с учетом его плотности, прочности и плотности материала матрицы.

3. Экспериментально исследованы структурно-технологические характеристики водных пен, полученных на основе синтетических и белковых пенообразователей. Выведена формула расчета толщины его слоя на поверхности воздушных пор, установлена зависимость **пенообразования** от концентрации ПО в растворе и скорости вращения мешалки. Предложен **двухстадийный** способ приготовления пен, обеспечивающий максимальное значение коэффициента использования пенообразователя и максимальную стабильность пены.

4. Предложен ускоренный способ определения стабильности пен по их подвижности, точность которого составляет 90-95%. Разработан метод определения оптимальной плотности водных пен, обеспечивающих стабильность пенобетонной смеси и прочность цементных перегородок в отвердевшем ячеистом материале. Оптимизированы основные параметры пен на промышленных пенообразователях для получения «сверхлегкого» пенобетона.

5. Исследована структура и стабильность пенобетонной смеси, выявлен и обоснован эффект самозалечивания дефектов межпоровых перегородок. Предложены и экспериментально проверены оптимальные составы пенобетонных смесей для «сверхлегкого» пенобетона и режимы их приготовления. Установлена возможность регулирования размеров пор пенобетонной смеси путем изменения плотности водной пены и дисперсности цемента. Выявлен положительный **эффект** применения более плотной пены на **ПО-6ЦГ** ( $100 \text{ кг/м}^3$  вместо  $70 \text{ кг/м}^3$ ), связанный с улучшением структуры пенобетона и повышением его прочности.

6. На основе расчета и экспериментальных данных определена оптимальная толщина межпоровой перегородки для «сверхлегкого» пенобетона, при которой достигается его наибольшая прочность, а именно: 20-30 мкм при плотности цементного камня  $2600 \text{ кг/м}^3$ . Определен оптимальный средний диаметр пор в пенобетоне плотностью

100, 150 и 200 кг/м<sup>3</sup>, который равен 1,5-2; 1-1,5 и 0,75-1 мм, соответственно. Обнаружен положительный эффект увеличения среднего диаметра пор «сверхлегкого» пенобетона, вызывающего повышение прочности и снижение усадки материала. Определены основные технические показатели «сверхлегкого» пенобетона плотностью 100,150 и 200 кг/м<sup>3</sup>: прочность при сжатии 1; 2,5; 5,1 кг/см<sup>2</sup> соответственно;  $\lambda=0,045; 0,055$  и  $0,07$  Вт/м<sup>0</sup>С; сорбционная влажность 8; 7,7 и 9%, водопоглощение 30, 28 и 25%, паропроницаемость 0,4; 0,34 и 0,3 мг/м.ч.Па.

7. Разработан технологический регламент на производство безавтоклавного пенобетона, учитывающий практические результаты исследований, реализованный на заводе ЖБИ ассоциации «Унистрой» (г. Волжск, Марий Эл). Выпущена опытная партия «сверхлегкого» пенобетона плотностью 150-200 кг/м<sup>3</sup>, свойства которого соответствуют разработанным образцам. Экономический эффект от замены теплоизоляционного слоя из минераловатной плиты ( $\rho=150$  кг/м<sup>3</sup>) на «сверхлегкий» пенобетон ( $\rho=200$  кг/м<sup>3</sup>) в 1 м<sup>2</sup> стены жилого здания составляет 170 р/м<sup>2</sup>.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

1. Кондратьев В. В., Морозова Н. Н., Хозин В. Г. Перспективы получения сверхлегких пенобетонов безавтоклавного твердения. Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы шестых академических чтений РААСН / Иванов. гос. архит.-строит. акад. Иваново, 2000. - С. 249-252.

2. Кондратьев В. В., Морозова Н. Н., Хозин В. Г. Технологические основы получения «сверхлегкого» пенобетона для строительства жилых зданий каркасного типа. Рациональные энергосберегающие конструкции, здания и сооружения в строительстве и коммунальном хозяйстве: Сб. науч. тр. Международной научн.-практ. конф. - Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002. - Ч.2. - С. 121-125.

3. Кондратьев В. В., Морозова Н. Н., Хозин В. Г. Структурно-технологические основы получения сверхлегких пенобетонов// Строительные материалы. - 2002, № 11. - С. 35-37.

4. Кондратьев В. В., Морозова Н. Н., Хозин В. Г. К методике оценки стабильности пен, применяемых в производстве пенобетона. - Саранск: Мордовский гос. университет, 2002. - С. 142-145.

5. Кондратьев В. В., Морозова Н. Н., Хозин В. Г. Местные пенообразователи для производства пенобетона.// Международная НТК «Композиционные строительные материалы. Теория и практика». - Пенза: ПенГАСА, 2000. - С. 148-150.